

DESENVOLVIMENTOS NA AUTOMAÇÃO DO PROJETO À FADIGA SOB CARREGAMENTOS COMPLEXOS

Marco Antonio Meggiolaro¹
Jaime Tupiassú Pinho de Castro²

Resumo

Um programa amigável e extremamente versátil chamado **VIDA** foi desenvolvido em ambiente Windows para calcular o dano à fadiga causado por carregamentos de qualquer complexidade, com o objetivo de automatizar *todas* as metodologias tradicionalmente usadas em projeto mecânico: os métodos SN, IIW (para estruturas soldadas) e ϵN para prever a iniciação e o da/dN para a propagação das trincas (planas e tridimensionais). O programa parte da seqüência dos picos e vales (ou das componentes médias e alternadas) do carregamento aplicado sobre a peça, e inclui bancos de dados com propriedades mecânicas de materiais estruturais, fatores de concentração e de intensidade de tensões, contador *Rain-Flow*, gerador de laços de histerese elastoplástica, ajuste automático de dados experimentais, interpretador para equações de K_I e K_t , e inúmeras opções de modelos para calcular o dano acumulado por fadiga.

Palavras-Chaves: Fadiga, Carregamentos Complexos, Previsão de Vida

1. Introdução:

A previsão da vida à fadiga de componentes estruturais sujeitos à carregamentos complexos é uma tarefa muito trabalhosa, principalmente quando se quer comparar as diversas metodologias de cálculo comumente usadas em projeto mecânico. Para automatizar esta tarefa foi desenvolvido o programa **VIDA**, que roda em ambiente Windows, possui uma interface com o usuário intuitiva e amigável para aqueles familiarizados com os fundamentos do projeto mecânico à fadiga, inclui uma série de informações necessárias aos cálculos (propriedades dos materiais, fatores de concentração e intensidade de tensões, efeitos do acabamento superficial, tamanho, etc.), além de *todos* os modelos de cálculo tradicionalmente usados em projeto: os métodos SN, IIW e ϵN para prever a iniciação das trincas, e o da/dN para prever a propagação a partir dos conceitos da Mecânica da Fratura.

Devido às limitações de espaço, o objetivo deste trabalho é apenas descrever os fundamentos das principais opções oferecidas pelo programa, e apresentar uma breve descrição das suas diversas telas e potencialidades computacionais. A versão β do programa estará disponível para testes e comentários da comunidade num futuro próximo, e os interessados devem contatar o **CEIE** - Centro de Estudos de Integridade Estrutural da PUC-Rio para maiores esclarecimentos.

2. Filosofia do Programa:

Ao contrário do projeto ao colapso plástico ou à flambagem, que só requerem as propriedades *globais* da peça, o projeto à fadiga é um problema local que depende dos detalhes da geometria e do material dos **pontos** mais solicitados da peça, cujas dimensões devem ser compatíveis com o modelo de cálculo. No projeto tradicional à fadiga [1-9] é comum assumir-se isotropia e homogeneidade, e neste caso um *ponto* é definido pelo tamanho do volume que caracteriza a anisotropia intrínseca da microestrutura do material: por exemplo, cerca de 0,1 a 1mm³ na maioria dos metais estruturais, cujo tamanho de grão é, tipicamente, de 10 a 100µm.

O **VIDA** baseia-se na clássica Corrente de Avaliação de Integridade Estrutural, pela qual o dimensionamento à fadiga requer informações em seis áreas complementares de igual importância [10]:

- (i) **Dimensões Geométricas** (incluindo entalhes e trincas, caso presentes).
- (ii) **Cargas de Serviço** (que na prática devem frequentemente ser *medidas*).
- (iii) **Análise de Tensões** (nos *pontos* críticos, para prever iniciação das trincas).
- (iv) **Análise das Trincas** (para prever sua propagação).
- (v) **Propriedades dos Materiais** (preferencialmente *medidas*).
- (vi) **Análise do Acúmulo de Dano** (p.ex. Wöhler-Goodman-Miner no SN).

Note-se que a precisão das previsões é controlada pelo elo *menos* preciso desta corrente, logo não adianta sofisticar os modelos de análise de tensões, de trincas e de acúmulo de dano (que dependem de formação acadêmica), se os outros elos (que dependem de informações experimentais) não forem igualmente bem conhecidos. O **VIDA** é um algoritmo de cálculo extremamente sofisticado e amigável, mas suas previsões partem de informações sobre carga, geometria e propriedades que devem ser fornecidas pelo usuário. *Os bancos de dados disponíveis no programa não substituem as informações experimentais indispensáveis às aplicações práticas.*

A tela de entrada do programa é ilustrada na figura 1. Sua aparência é a usual no ambiente Windows, e na sua parte superior apresenta cinco opções geradoras de menus.

A opção **Arquivo** serve para carregar histórias de carregamento, propriedades de materiais, ou cadastros de fatores de concentração de tensão K_t , fatores de intensidade de tensão K_I , ou equações de propagação da/dN . Todos estes arquivos são facilmente editáveis e expansíveis.

As cargas podem ser especificadas em tensão (σ , MPa) ou em deformação (ϵ , µm/m ou µε) e a história do carregamento pode ser dada por sua seqüência ordenada de picos e vales ou pelo seu equivalente em cargas médias, alternadas e número de 1/2 ciclos, ou então por um histograma. A informação pode ser manualmente digitada, e blocos de carregamento podem ser facilmente duplicados. Também pode-se importar arquivos já disponíveis, inclusive os gerados experimentalmente (o **VIDA** reconhece arquivos Excel e também os gerados por alguns equipamentos dedicados, como o histogramador digital Kyowa RHS 500 ou o programa Instron *Wavemaker*).

No caso de especificar-se picos e vales, o programa automaticamente corrige a digitação para uma lista seqüenciada de máximos e mínimos, só considerando o maior valor de uma série de números monotonicamente crescente, ou o mínimo de uma série decrescente. A *ordem* do carregamento é preservada, o que é particularmente importante para minimizar-se efeitos de seqüência no acúmulo de dano.

No caso de especificar-se cargas médias e alternadas, a amplitude σ_a ou ε_a tem obviamente que ser um número positivo, enquanto a média σ_m ou ε_m pode ser compressiva ou trativa, já que nos cálculos são reconhecidas as diferenças entre seus efeitos na vida à fadiga. Com a história de carregamento, o **VIDA** pode filtrar (segundo um patamar ajustável) os dados em *amplitude*, seguindo a idéia do método *Race-Track*, executar a contagem *Rain-Flow* e a plotagem dos dados, para visualização dos resultados, ver fig. 2. Para evitar que a contagem *rain-flow*, como qualquer estatística, perca informações de seqüência, há a opção de ordená-la mantendo a localização de seus picos.

A filtragem em amplitude é particularmente útil para diminuir o esforço computacional nos cálculos de dano à fadiga, mas deve ser usada com cuidado porque despreza carregamentos, o que é um procedimento intrinsecamente não-conservativo. Uma boa regra é limitar o patamar de corte ao valor do limite de fadiga na carga média em questão, já que solicitações menores que este valor não causam dano à peça [11].

Na opção *Arquivo* também pergunta-se qual o material da peça, para que se possa identificar suas propriedades mecânicas. O programa fornece um banco de dados que já conta com as propriedades *nominais* de cerca de uma centena de materiais diferentes, o qual pode ser facilmente expandido sem limites de armazenamento, e cuja tela é ilustrada na fig. 3. Dentre as principais características deste banco de dados destacam-se:

(i) Capacidade de selecionar materiais ordenando-os por uma ou mais propriedades (p.ex., pode-se listar os materiais com resistência à ruptura S_u entre 500 e 700MPa e tenacidade K_{IC} maior que 100MPa \sqrt{m});

(ii) Geração automática dos gráficos SN, εN , da/dN vs. ΔK , e $\sigma \varepsilon$ real (monotônico e cíclico) correspondentes às propriedades listadas, com *zoom* e eixos ajustáveis (basta *clique* sobre os gráficos para expandi-los, e pode-se imprimi-los diretamente);

(iii) *Ajuste de tabelas de pontos experimentais*, com geração de gráficos e cálculo automático das propriedades correspondentes.

Note-se que o banco de dados das propriedades à fadiga dos materiais estruturais e o contador de ciclos correspondem ao quinto e ao segundo elo, respectivamente, da corrente mencionada acima, e que os resultados das filtrações, ajustes de dados experimentais, etc., influem nos cálculos de dano à fadiga, e devem ser usados conscientemente.

Os cadastros de K_t , K_I e da/dN podem ser editados através de um interpretador de fórmulas matemáticas bastante intuitivo. A versão definitiva do programa deverá contar com todas as informações contidas nas referências tradicionais tipo Peterson [12,13] ou Tada [14].

A opção seguinte da tela inicial do programa chama-se *Vida*, e é sua parte mais importante (tanto que o batiza). Ela inclui *todas* as metodologias tradicionais de projeto à fadiga, *em toda a sua complexidade*. Estes métodos são:

3. Método SN:

O cálculo pelo **VIDA** do número de ciclos necessários para iniciação de uma trinca segundo o método SN segue as idéias tradicionais consagradas pelo uso em projeto mecânico [1-6], com algumas melhorias não-usuais muito interessantes proporcionadas pelo poder da ferramenta computacional (como o reconhecimento do efeito de sobrecargas nas tensões residuais, conforme explicado abaixo). Sua tela está na fig. 4.

Este método só é normalmente aplicável a carregamentos elásticos, logo às longas vidas de iniciação (ao contrário do ϵN , o SN não considera de forma explícita os efeitos elastoplásticos cíclicos eventualmente presentes nas raízes dos entalhes e, como aquele, não reconhece a presença de trincas). Entretanto, o SN é muito mais rápido que o ϵN , conta com um vastíssimo banco de dados, e pode ser usado em muitos casos práticos.

Para prever-se a resistência da peça à fadiga, primeiro a curva de Wöhler padrão do material (estimada pelo programa caso não haja um conjunto de resultados experimentais confiáveis) é modificada pelos fatores de acabamento superficial, tamanho, forma de carregamento, etc., característicos do ponto mais solicitado da peça, seguindo especificamente as equações propostas em [3] (ver fig. 5). Todos os fatores são calculados pelo **VIDA**, mas *podem* ser modificados pelo usuário, caso desejado. Também se pode desconsiderar o limite de fadiga S_e para os aços, retirando o cotovelo e mantendo ou modificando a inclinação da curva SN a partir da vida correspondente.

Partindo da curva SN são gerados os diversos diagramas $S_a S_m$: Goodman, Gerber e Sodeberg, havendo até previsão para que o usuário especifique um diagrama personalizado tipo $\left(\frac{\sigma_a}{S_a}\right)^r + \left(\frac{\sigma_m}{S_m}\right)^s = 1$, definindo a resistência à carga média S_m e os expoentes r e s . A resistência à carga alternada S_a é retirada da curva de Wöhler. Nos diversos diagramas $S_a S_m$ a parte correspondente à carga média compressiva pode ser considerada de duas formas: ou desprezando seu efeito (fazendo $\sigma_m = 0$ quando σ_m for negativo) como proposto por Shigley, ou usando Goodman para quantificar seu benefício.

Há um banco de dados com fatores de concentração de tensões K_t para diversas geometrias (fig. 6), mas o usuário pode entrar com um dado ou com uma equação de sua preferência, pois o **VIDA** possui um interpretador de equações (fig. 7). K_t pode ser modificado pela sensibilidade ao entalhe q e transformado em $K_f = 1 + q(K_t - 1)$, para multiplicar o valor dos carregamentos nominais e calcular as tensões causadoras do trincamento por fadiga, sendo que o valor de q é calculável pelo programa, em função da resistência à ruptura do material e do raio do entalhe (fig. 8). Há também a opção de se aplicar ou não o efeito da concentração de tensões sobre a componente média do carregamento. Além disto, para melhorar a interpretação dos resultados calculados pelos diversos modelos, o programa gera gráficos de dano versus evento para cada um deles.

Uma característica não-usual implementada no **VIDA** é o reconhecimento do efeito das tensões residuais provocadas pelos gradientes de deformação plástica, causados por sobrecargas esporádicas superpostas a um carregamento de outra forma elástico. A idéia é aproveitar o modo seqüencial de entrada de dados, o qual contém a informação da **ordem** dos carregamentos. (É claro que no modo histograma esta informação é perdida, já que toda estatística é não-ordenável). Ao reconhecer uma componente do carregamento que provoque tensões maiores que a resistência ao escoamento S_Y localmente na raiz do entalhe, o programa aplica apenas a este ciclo a metodologia ϵN para calcular a tensão residual resultante do descarregamento desta sobrecarga, e passa a somá-la à componente média dos ciclos subsequentes. A grande vantagem deste método é propiciar um acúmulo de dano que reconhece o principal efeito de seqüência no carregamento, eliminando assim (pelo menos parcialmente) a principal desvantagem da regra de Miner. Também não se perde a vantagem computacional, pois o método SN é aplicado a todos os ciclos elásticos do carregamento antes e após a sobrecarga.

4. Projeto de Estruturas Soldadas:

Estritamente falando, o projeto à fadiga de estruturas soldadas é um sub-conjunto do método SN particularmente simples, mas ainda pouco divulgado. A metodologia é baseada em testes com estruturas e não com corpos de prova soldados, já que pelas características do processo de soldagem há uma significativa diferença entre eles, devido principalmente às tensões residuais de soldagem e às características geométricas dos filetes mais longos, como tamanho e distribuição dos poros e inclusões.

Estes testes permitiram que a metodologia normalizada pelos diversos órgãos internacionais de projeto de estruturas soldadas como o IIW - International Institute of Welding, a AWS - American Welding Society, etc., fosse baseada em apenas duas premissas simples. Os métodos normalizados assumem que a resistência de uma junta estrutural soldada (executada segundo padrões de controle de qualidade industriais em aço estrutural ao C ou C-Mn) depende apenas de dois fatores [15]:

(i) da geometria ou do tipo da junta, que é classificada em diversas classes como as ilustradas na fig. 9 (que são as normalizadas pelo IIW); e

(ii) da faixa do carregamento nominal $\Delta\sigma$, mas não da carga média.

O **VIDA** reconhece todas as classes de juntas normalizadas pelo IIW (e há previsão de incluir as padronizadas pelos outros órgãos no futuro), permite a escolha entre as diversas opções permitidas pela norma (expoente de Wöhler 3.0 ou 3.5, existência ou não de um cotovelo em $5 \cdot 10^6$ ciclos, etc.), e calcula o dano seguindo os mesmos procedimentos já descritos acima.

5. Método ϵN :

O método ϵN tradicional baseia-se no trinômio {regra de Neuber - laço de histerese elastoplástica - regra de Coffin-Manson}, e usa regra de Miner para acúmulo de dano. Como o SN, também só se aplica a peças não-trincadas, mas por reconhecer explicitamente as deformações plásticas cíclicas pode ser usado para qualquer vida. A tela que o programa gera para o método ϵN é mostrada na fig. 10.

Este é um método moderno e de popularidade crescente, corroborado por instituições tradicionais como a SAE [16], mas que tem certas idiosincrasias relativamente pouco conhecidas, e que devem ser respeitadas sob pena de graves insucessos: deve-se enfatizar que o método ϵN é não-linear, logo não segue o princípio da superposição. Por isto, o método é *sensível à ordem do carregamento e ao estado inicial da peça*. O **VIDA** segue todos os passos necessários para efetuar adequadamente os cálculos ϵN , incluindo alguns procedimentos não-usuais conforme discutido adiante.

A metodologia clássica trabalha com tensões e deformações reais, usa relações $\sigma\epsilon$ tipo Ramberg-Osgood e considera o amolecimento ou endurecimento cíclico, mas não o transiente a partir do comportamento monotônico: assume-se que as amplitudes das deformações e tensões sigam uma equação para o laço de histerese expressa por:

$$\Delta\epsilon/2 = \epsilon_a = \epsilon_a(\text{elástico}) + \epsilon_a(\text{plástico}) = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'}$$

onde E é o módulo de Young, K' o módulo de plasticidade e n' e o expoente de encruamento da curva $\sigma\epsilon$ cíclica estabilizada, respectivamente.

A regra de Neuber diz que $K_t^2 = \sigma \varepsilon / s \cdot e$, onde $\sigma \varepsilon$ são as tensão e deformação provocadas na raiz do entalhe pelas tensão e deformação nominais $s \cdot e$. No caso cíclico onde as tensões nominais sejam elásticas esta regra pode ser escrita $K_t^2 = \Delta \sigma \Delta \varepsilon E / \Delta s^2$.

Já a regra de Coffin-Manson é expressa por $\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c$, onde σ'_f , ε'_f , b e c são constantes do material.

Há algum suporte experimental para justificar o uso destas simplificações, *mas em geral a literatura não reconhece explicitamente a grande importância do estado inicial da peça e da ordem do carregamento no resultado das previsões feitas com o seu uso no caso de carregamentos complexos*. A forma tradicional de se projetar nestes casos é calcular o dano d_i provocado pela aplicação das n_i reversões ou 1/2 ciclos do i -ésimo carregamento nominal Δs_i , contados pelo método Rain-Flow, e usar a regra de Miner para acumular o dano $d_i = n_i / 2N_i$, sendo N_i o número de ciclos que a peça duraria se somente este carregamento Δs_i estivesse atuando. Para carregamentos nominais elásticos, este método tradicional pode ser resumido por:

(i) Dado o carregamento Δs_i , calcula-se a tensão $\Delta \sigma_i$ na raiz do entalhe, e

(ii) Calcula-se o $\Delta \varepsilon_i$ causado por $\Delta \sigma_i$, e os correspondentes N_i e d_i :

$$\left(K_t \Delta s_i \right)^2 = \Delta \sigma_i \cdot \left(\Delta \sigma_i + 2E \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_i}{2K'} \right)^{1/n'} \right)$$

$$\frac{\Delta \sigma_i}{E} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_i}{2K'} \right)^{1/n'} = \Delta \varepsilon_i = \frac{2\sigma'_f}{E} (2N_i)^b + 2\varepsilon'_f (2N_i)^c \Rightarrow d_i = \frac{n_i}{2N_i}$$

Estas equações não são inversíveis, logo o uso do método εN é computacionalmente trabalhoso, o que explica (mas não justifica) a pouca divulgação dos problemas que o seu uso não criterioso pode acarretar: *a simples aplicação destas equações a uma contagem rain-flow não é suficiente para garantir laços de histerese fisicamente admissíveis*. De fato, pode-se afirmar que antes de mais nada deve-se garantir que o modelo de cálculo reproduza os laços de histerese que atuam na raiz do entalhe, para só então calcular o dano por eles provocado. Como a prática ensinou dolorosamente aos autores que a única maneira de se evitar erros com o uso do εN é *desenhando* os laços de histerese, a seguir são discutidos três problemas que ilustram os cuidados necessários à correta aplicação desta metodologia:

(1) Problema do *envoltório dos laços de histerese*. Segundo Coffin-Manson, quem causa o dano por fadiga é a faixa de deformações atuantes na raiz do entalhe. Logo $\Delta \varepsilon$ tem que ser calculado corretamente. Mas os incrementos de deformação plástica *são* dependentes da história prévia, logo do estado inicial da peça. Mesmo que a peça seja virgem, que o estado de tensões e deformações residuais seja zero, e que se possa desprezar os transientes de amolecimento ou endurecimento cíclico, ainda assim é necessário distinguir entre o primeiro 1/2 ciclo do carregamento e os subsequentes. Neste caso o primeiro 1/2 ciclo segue a relação $\sigma \varepsilon$ cíclica $\varepsilon = \sigma/E + (\sigma/K')^{1/n'}$ e não as equações do laço, que desta diferem por um fator de 2. Portanto, para se calcular o dano d_1 do primeiro 1/2 ciclo do carregamento é necessário seguir:

$$\left(K_t s_1 \right)^2 = \sigma_1 \cdot \left(\sigma_1 + E \cdot \left(\frac{\sigma_1}{K'} \right)^{1/n'} \right)$$

$$\frac{\sigma_1}{E} + \left(\frac{\sigma_1}{K'} \right)^{1/n'} = \varepsilon_1 = \frac{2\sigma'_f}{E} (2N_1)^b + 2\varepsilon'_f (2N_1)^c \Rightarrow d_1 = \frac{1}{2N_1}$$

Mas este cuidado indispensável ainda não é suficiente. Conforme ilustrado na fig. 11, é também necessário garantir que todos os eventos subsequentes não ultrapassem a curva $\sigma\varepsilon$ cíclica, nem o envoltório dos laços de histerese. Para isto, *ao se calcular a deformação causada por um dado incremento do carregamento Ds_i , deve-se verificar se e quando as deformações previstas pela equação do laço histerese cruzam a curva $\sigma\varepsilon$ cíclica ou o maior dos laços previamente induzidos na raiz do entalhe* (aqui chamado de "olhão"). No caso de cruzamento, deve-se abandonar a equação do laço a partir de sua interseção com a curva $\sigma\varepsilon$ (ou com o "olhão") e passar a seguir a curva $\sigma\varepsilon$ (ou a do "olhão") até o fim do carregamento Δs_i . Este passo é complicado, mas é absolutamente indispensável sob pena de:

- (i) se fazer previsões fisicamente inadmissíveis, como *dobrar* a resistência do material através de um carregamento cíclico, **e**
- (ii) se fazer uma previsão *não-conservativa* do dano causado pelo carregamento pois, conforme mostrado na fig. 11, só se efetuando a troca das equações chega-se ao $\Delta\varepsilon_i$ correto, que é *maior* do que o que seria previsto pela equação do laço.

Para fugir destes problemas, as vezes os livros-texto [2, 6] recomendam que se reordene os carregamentos, colocando o maior deles em primeiro lugar. Este também não é um procedimento adequado, conforme mostrado pelo próximo caso:

(2) Problema do efeito da ordem do carregamento. Seja uma história como a mostrada na fig. 12. A inversão da ordem dos carregamentos altera completamente os laços de histerese na raiz do entalhe, logo o dano por eles provocado. Conforme afirmado acima, sem desenhar os laços de histerese fica realmente difícil visualizar o problema de fadiga elastoplástica, quiçá equacioná-lo.

Estes problemas causados pelo ordem do carregamento e pela limitação do laço de histerese elastoplástica nos levam a questionar o uso dos procedimentos εN em peças usadas, e cuja história seja ignorada: o desconhecimento do atual estado de tensões e deformações residuais na raiz do entalhe crítico *invalida* as previsões feitas a partir da solução repetida das equações do laço de histerese. Em peças que não sejam virgens, é necessário medir o estado de tensões e deformações residuais no ponto crítico, para se poder prever os laços subsequentes. E, como é a história $\sigma\varepsilon$ na raiz do entalhe que importa, não adianta medir tensões residuais fora do ponto crítico da peça.

Por fim, há um terceiro problema ainda mais sutil a ser considerado. É fato reconhecido que o método *rain-flow* é a melhor maneira de separar um carregamento complexo em suas componentes σ_{ai} , σ_{mi} e n_i para efeito de cálculo de dano à fadiga. De fato, este método conta adequadamente *todos* os eventos, sem repeti-los. Mas no método εN o que importa são as componentes ε_{ai} e ε_{mi} que (novamente) atuem na raiz do entalhe crítico. Devido a não-linearidade intrínseca do método εN , *quando* se executa a contagem *rain-flow* acaba sendo importante, como discutido no próximo caso:

(3) Problema do *momento certo para se efetuar a contagem rain-flow*. A prática usual, como se sabe, é fazer a contagem do carregamento. Quando se trabalha com o método SN, que é conceitualmente linear elástico, esta é prática é correta, já que neste caso a ordem dos carregamentos é irrelevante. (Com o efeito da sobrecarga elastoplástica discutido acima este quadro muda, sendo necessário quantificar seus efeitos no *instante* de sua ocorrência, nem antes nem depois). Mas no método ϵ N este procedimento de contar o *carregamento* e não o seu *efeito* é totalmente *inadequado*, conforme ilustrado na fig. 13.

Como o método *rain-flow* gera uma tabela na qual a *ordem* dos carregamentos é alterada (ver na fig. 2 um exemplo de como a contagem *rain-flow* altera a seqüência das cargas médias e alternadas), o procedimento correto é:

(i) calcular *primeiro* os laços de histerese induzidos pelo carregamento Δs_i na raiz do entalhe, na seqüência em que eles efetivamente ocorrem, laços estes que devem ser calculados com os cuidados necessários para corrigir devidamente os efeitos de ordenamento e limitação, e

(ii) só depois então se fazer a contagem *rain-flow* nas deformações $\Delta \epsilon_i$ resultantes - e esta contagem é indispensável para o cálculo correto do dano!

De fato, o método ϵ N é bem menos simples do que aparenta. Para tratá-lo com os cuidados devidos, o **VIDA segue todos os procedimentos discutidos acima**. O programa também desenha a curva ϵ N, plota sobre ela a curva SN tradicional, permite forçar a componente elástica da deformação a atingir a curva SN no limite, dá a opção de trocar-se a regra de Neuber pela regra linear de concentração de deformações [2], desenha os laços de histerese *devidamente corrigidos*, e calcula a vida não só por Coffin-Manson e pelo método das inclinações universais de Manson, que não consideram a carga média, como também considera os efeitos da componente média do carregamento por Morrow, Morrow modificado (que inclui os efeitos de ϵ_{mi} na componente plástica) e por Smith-Topper-Watson. Como no método SN, o programa também gera gráficos de dano versus evento para cada um dos modelos.

E, para quando não se conhecer a história prévia da peça e ainda assim se quiser fazer uma *estimativa* ϵ N, ou para aqueles que quiserem desconsiderar os efeitos de ordenamento, o programa permite que sejam efetuados os cálculos tradicionais mas, como bem diriam os americanos, *at his own risk*. Mas, para que se considere o efeito das cargas médias nesta estimativa (isto é, para se usar Morrow ou STW) é necessário *arbitrar* uma origem no plano σ - ϵ para os laços de histerese, ou então só se pode calcular as vidas por Coffin-Manson ou pelas inclinações universais.

6. Método da/dN:

Para prever o crescimento das trincas de fadiga, o **VIDA** usa as telas mostradas nas figuras 14 (para as trincas planas) e 15 (para as trincas tri-dimensionais). A propagação das trincas é tratada pelos conceitos tradicionais da Mecânica da Fratura [7-9], assumindo-se que as taxas de propagação da/dN (e também dc/dN no caso das trincas tri-dimensionais) se correlacionam primariamente com a faixa de variação do fator de intensidade de tensões ΔK_I . Para isto, na tela do material (fig. 3) devem ser especificadas propriedades como limiar de propagação ΔK_{th} , tenacidade K_{IC} e as constantes das regras de Paris e de Elber.

(Na realidade estamos associando aqui com o nome de Elber uma regra que inclui uma pequena modificação em relação à sua proposição original. Elber introduziu o conceito de fechamento da trinca e propôs que a taxa de propagação fosse correlacionada com o valor efetivo de ΔK , definido por $\Delta K_{ef} = (K_{max} - K_{ab})$, onde K_{ab} é o valor do fator de intensidade de tensões que abre completamente a trinca de fadiga. Desta forma, $da/dN = A(\Delta K_{ef})^m$. Estamos usando aqui a variação $da/dN = A(\Delta K - \Delta K_{th})^m$, assumindo que o valor do limiar ΔK_{th} se comporte como a carga de abertura. Esta regra se ajusta bastante bem às regiões I e II da curva de propagação de muitos materiais estruturais, ver a referência [17] que consta dos Anais deste Simpósio).

O programa tem um banco de dados com várias regras de propagação (e sempre usa pelo menos as de Paris e de Elber), e permite que o usuário especifique qualquer outra que seja de seu agrado, através de seu interpretador de equações. Os valores das constantes das diversas regras podem ser facilmente variados: nas telas de crescimento de trinca há um campo chamado *variáveis*, no qual se pode especificar valores numéricos para cada uma das letras correspondentes, as quais são usadas para definir as equações.

Uma facilidade particularmente interessante incluída no **VIDA** é proporcionada pelo gráfico de propagação mostrado nas telas das fig. 14 e 15 no qual se plota, além de Paris e Elber, as regras de propagação escolhidas pelo usuário (para se expandir o gráfico, basta *clique* sobre ele). Desta forma se tem uma informação visual imediata sobre a concordância entre as diversas regras, o que permite um fácil e conveniente ajuste de suas constantes. Além disto, conforme já foi comentado, o programa também inclui uma facilidade de ajuste automático de dados experimentais. Uma vez garantido que as diversas regras se ajustem devidamente ao comportamento do material, se pode facilmente estudar a sensibilidade das previsões aos diversos modelos.

Deve-se mencionar que o modelo de Paris, devido à sua simplicidade matemática, é de longe o mais aplicado na prática. Entretanto, o seu uso pode ser extremamente conservativo em todos os casos onde as trincas iniciais sejam pequenas, e induzam valores de ΔK próximos a ΔK_{th} . Nestes casos o modelo de Paris é simplista, como exemplificado em [17]. Desta forma, o uso de diversos modelos de propagação para calcular o dano por fadiga pode ser muito importante ao se projetar, pois *a maior parte da vida das peças é consumida para propagar as trincas pequenas*.

O **VIDA** permite que se calcule a propagação correspondente a um dado carregamento especificado (tensão $\Delta\sigma_i$ atuando durante n_i ciclos), ou que se especifique as dimensões iniciais e finais da trinca, caso se queira calcular a vida correspondente. Em ambos os casos, se durante o carregamento ocorrer (i) fratura por $K_{max} = K_{IC}$, ou (ii) escoamento do ligamento residual antes que o valor especificado para n_i ou para o tamanho máximo da trinca seja atingido, o programa automaticamente pára os cálculos, e indica o instante desta ocorrência. Desta forma pode-se usar os valores calculados com a garantia de que o limite de validade dos modelos matemáticos nunca é excedido.

No caso das trincas tri-dimensionais, o programa também pára os cálculos quando uma das fronteiras da peça é atingida pela trinca, e além disto desenha as frentes de trinca a cada evento especificado pelo usuário, para que se possa acompanhar as mudanças de geometria que ocorrem durante a sua propagação [17]. E, para conveniência do usuário, também plota gráficos da variação da forma de trinca a/c , de $K(a)$, $K(c)$, etc., para que se possa estudar seu comportamento.

Uma facilidade muito interessante, e que pode ser usada para diminuir acentuadamente o tempo de computação (o que pode ser muito importante nas vidas longas, como as que são obtidas quando se trabalha com trincas pequenas), é a opção de se especificar uma porcentagem de variação na \sqrt{a} para mudar o valor de ΔK usado nos cálculos. Como no caso geral $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}f(a)$, pode-se dizer que a variação do fator de intensidade de tensões ΔK_i a cada ciclo do carregamento depende da variação da tensão naquele ciclo $\Delta\sigma_i$, e do comprimento da trinca naquele *instante*. Ora, desta forma ΔK depende de duas variáveis de natureza diferente. É claro que $\Delta\sigma_i$ pode em geral variar bastante a cada ciclo quando o carregamento é complexo, mas as trincas *sempre* se propagam muito devagar por fadiga, pois as maiores taxas de crescimento *estável* observadas na prática são da ordem de $\mu\text{m}/\text{ciclo}$, sendo que durante a maioria da vida as taxas são melhor medidas em nm/ciclo .

Como em geral as expressões para $f(a)$ são muito complexas mas não apresentam descontinuidades, pode-se tirar proveito da pequena mudança no produto $\sqrt{a}f(a)$ para pequenos incrementos no comprimento da trinca. Desta forma em vez de se calcular a cada ciclo $\Delta K_i = \Delta\sigma_i\sqrt{\pi a_i}f(a_i)$, o que demandaria grande esforço computacional, pode-se manter o produto $\sqrt{a}f(a)$ constante enquanto \sqrt{a} não variar da (pequena) porcentagem especificada pelo usuário do programa.

Para considerar o efeito do carregamento complexo, o **VIDA** usa dois métodos:

(i) calcula o crescimento da trinca a cada 1/2 ciclo, incrementando-a de $\delta a_i = F(\Delta K_i)/2$ (ou de $\delta a_i = F[\Delta K(a_i)]/2$ e de $\delta c_i = F[\Delta K(c_i)]/2$ no caso tri-dimensional), onde F é a função que exprime a lei de propagação escolhida (e que pode incluir os efeitos da carga média, etc.), e

(ii) usa o método do valor médio quadrático ΔK_{rms} proposto por Barson e Rolfe [7], seguindo especificamente o algoritmo de Hudson [18]. Em ambos os casos a parte negativa dos carregamentos é desconsiderada.

Como nenhum dos modelos clássicos propostos para quantificar os efeitos dos retardo causados por sobrecargas conseguiu reconhecimento universal, pela relativamente baixa confiabilidade de suas previsões e pela sua alta complexidade computacional, e como o objetivo deste programa é fornecer automação para os *métodos tradicionais de projeto à fadiga*, optou-se por não inclui-los nesta versão do programa.

Para se efetuar o cálculo do crescimento ciclo a ciclo é importante introduzir uma pequena mudança na contagem *rain-flow*, como indicado na fig. 16, pois os efeitos de ordem do carregamento na propagação das trincas são de duas naturezas distintas:

(i) os de plasticidade ou correlatos, que podem induzir efeitos de retardo no crescimento subsequente da trinca, e que podem ser causados por fechamento tipo Elber ou por bifurcações, assunto este fascinante mas que, por falta de espaço, tem que ser considerado fora do escopo desta discussão [19,20], e

(ii) os relacionados com eventos de fratura, que dependem primariamente da relação entre K_{max} e K_{IC} . Estes últimos são muito mais dramáticos, pois significam a quebra da peça e tem que ser previstos com exatidão.

Por isto, no **VIDA** introduziu-se uma pequena modificação na maneira de ordenar a contagem *rain-flow*, que na sua versão original antecipa os grandes picos do carregamento, em relação ao real momento de sua ocorrência. A fig. 16 ilustra bem este problema.

Neste trabalho está sendo proposto que, para se evitar que o programa não reconheça um evento de quebra quando o pico de carga ocorra com a trinca já grande, este pico só seja contabilizado no instante de sua ocorrência. Como o programa sempre verifica se $K_{II} < K_{IC}$ (e também se não há escoamento do ligamento residual no i -ésimo carregamento), desta forma pelo menos elimina-se uma das desvantagens conceituais da contagem tradicional.

Por fim, a fig. 17 ilustra o crescimento de uma trinca superficial semi-elíptica, mostrando claramente a mudança de sua forma durante a propagação. Como todos os gráficos gerados pelo **VIDA** são facilmente plotáveis, este tipo de facilidade torna-se muito interessante para se visualizar e ilustrar os problemas de fadiga. Deve-se notar que quando o texto menciona as trincas tri-dimensionais, ele se refere aos problemas onde as três dimensões da peça são importantes, e onde as trincas crescem em duas direções, tendo portanto um crescimento bi-dimensional.

7. Conclusões:

Um programa chamado **VIDA** foi concebido para calcular vida à fadiga sob carregamentos complexos por todos os métodos usuais de projeto, incluindo todas as facilidades que pudessem ser úteis ao projetista, como banco de dados, inúmeras opções de cálculo, correções adequadas nas rotinas, interface amigável, etc. No atual estágio de desenvolvimento o programa já está com suas diversas opções operacionais, o que permite que sua versão β seja distribuída para os membros qualificados da comunidade que se associem ao **CEIE** e que tenham interesse em colaborar no desenvolvimento de sua versão definitiva.

8. Referências:

- [1] Juvinall,R.C. "Stress, Strain & Strength", McGraw-Hill 67.
- [2] Fuchs,H.O. & Stephens,R.I. "Metal Fatigue in Engineering", Wiley 80.
- [3] Shigley,J.E. & Mischke,C.R. "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill 89.
- [4] Hertzberg,R.W. "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", Wiley 89.
- [5] Castro,J.T.P. Um Método Racional Explícito para Projeto de Componentes Mecânicos Sujeitos a Carregamentos Dinâmicos Gerais", Rev.Bras.Ciênc. Mecânicas v.2, n.2, pp71-80, 79.
- [6] Dowling,N.E. "Mechanical Behavior of Materials", Prentice-Hall 93.
- [7] Barson,J.M. & Rolfe,S.T. "Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall 87.
- [8] Broek,D. "The Practical Use of Fracture Mechanics", Kluwer 88.
- [9] Anderson,T.L. "Fracture Mechanics", CRC 95.
- [10] Castro,J.T.P.; Giassone,A. & Kenedi,P.P. "Fatigue Propagation of Superficial Cracks in Wet Welds", Fracture, Fatigue and Life Prediction (SMIRT 13) pp.21-38, LNCC 95.
- [11] Castro,J.T.P.; Freire,J.L.F. & Vieira,R.D. "Fatigue Life Prediction of Repaired Welded Structures", J.Constructional Steel Research, V.28, pp.187-195, 94.
- [12] Peterson,R.E. "Stress Concentration Factors", Wiley 74.

- [13] Hardy,S.J. & Malik,N.H. "A Survey of Post-Peterson Stress Concentration Factor Data", Int.J.Fatigue v.14, n.3, pp.147-153, 92.
- [14] Tada,H. et.al. "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Paris Prod. 85.
- [15] Moura Branco,C. et al. "Fadiga de Estruturas Soldadas", Gulbenkian 87.
- [16] Rice,R.C., ed. "Fatigue Design Handbook", SAE 88.
- [17] Castro,J.T.P.; Giassoni,A. & Kenedi,P.P. "Propagação por Fadiga de Trincas Superficiais e de Canto em Soldas Molhadas", II Simpósio de Mecânica da Fratura, ABM 96.
- [18] Hudson,C.M. "A Root-Mean-Square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading", ASTM STP 748, pp.41-52, 81.
- [19] Suresh,S. "Fatigue of Materials", Cambridge 91.
- [20] Castro,J.T.P. "Load History Effects on Plane Strain Fatigue Crack Propagation", PhD Thesis, Mech.Eng.Dept. M.I.T. 82.

Abstract

A friendly and very versatile software named **VIDA** was developed in a Windows environment to calculate fatigue damage caused by complex loading, in order to automate *all* the traditional methodologies used in mechanical design: the SN, the IIW (for welded structures) and the ϵN methods to predict fatigue crack initiation, and the da/dN for the crack propagation (both of plane and tri-dimensional cracks). The program starts from the peak/valley (or from the mean and alternated components) of the loading sequence applied on the piece, and includes data banks on mechanical properties of structural materials, stress concentration and intensity factors, a rain-flow counter, a hysteresis loops generator, automatic adjustment of experimental data, an interpreter for K_I and K_t equations, and many options for modelling the damage caused by fatigue.

Key-Words: Fatigue, Complex Loading, Life Prediction